Wojciech Radziewicz
Politechnika Opolska
Instytut Elektrowni i Systemów Pomiarowych

System magazynowania energii CAES a energetyka wiatrowa

Energy storage system CAES and wind power engineering

Wzrost mocy zainstalowanej w elektrowniach wiatrowych na świecie sięga średnio 30% rocznie [1]. Obecnie na naszym globie zainstalowano ponad 194 GW mocy w energetyce wiatrowej[1)], a największą dynamikę wzrostu w 2010 roku osiągnęły Chiny, które wyprzedziły Stany Zjednoczone, stając się światowym liderem w zakresie zainstalowanej mocy w elektrowniach wiatrowych (42 GW) oraz w zakresie produkcji turbozespołów wiatrowych [8,9]. Również w Polsce występuje duże zainteresowanie energetyką wiatrową. Na koniec 2010 roku na terenie naszego kraju zainstalowano 1,1 GW mocy w farmach wiatrowych.

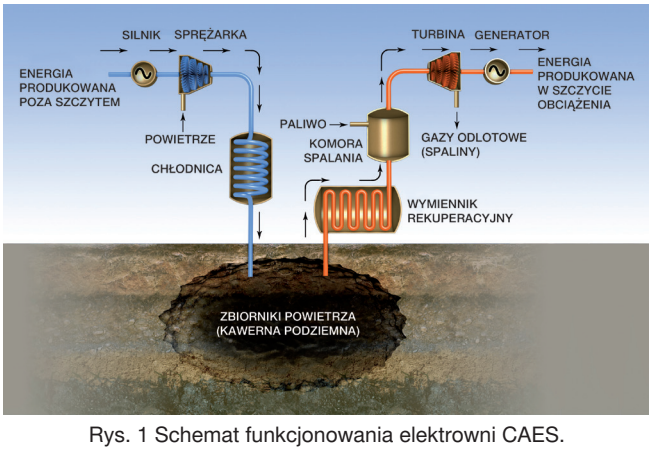
Podstawową wadą energetyki wiatrowej jest stochastyczność produkcji energii elektrycznej, a tym samym konieczność rezerwowania mocy w innych technologiach. Ograniczone możliwości swobodnego magazynowania energii sprawiają, że produkowana w farmach wiatrowych energia elektryczna zostaje wprowadzona do sieci w chwili wytworzenia. Jest to zjawisko niekorzystne zarówno z punktu widzenia Operatora Systemu Przesyłowego (dodatkowy czynnik losowy w bilansowaniu systemu), jak i z punktu widzenia wytwórcy (trudności związane z prognozowaniem przychodów).

Magazynowanie energii elektrycznej w systemach CAES

Zmienność występowania wiatru oraz okresowość zapotrzebowania na energię elektryczną powodują, że istnieje konieczność prowadzenia badań nad efektywnym magazynowaniem energii elektrycznej [4]. Obecnie istnieje kilka technologii magazynowania: bateryjne zasobniki energii, zasobniki kinetyczne, nadprzewodnikowe zasobniki energii, superkondensatory (ultrakondensatory), ogniwa paliwowe na paliwo wodorowe oraz elektrownie szczytowo- pompowe. Spośród tych technologii praktyczne zastosowanie dla energetyki zawodowej mają elektrownie szczytowo-pompowe.

Jednym ze sposobów magazynowania energii są także systemy CAES (*ang. Compressed Air Energy Storage*). Jest to technologia polegająca na magazynowaniu sprężonego powietrza w zbiornikach podziemnych. Ze względu na koszt budowy i rozmiary[2)], zbiorniki te są pochodzenia naturalnego, np.: kawerny solne, wyrobiska kopalni soli, wyrobiska w strukturze twardych skał, przestrzenie po warstwach wodonośnych.

Zasada akumulacji energii w układzie CAES polega na tym, że sprężanie czynnika roboczego następuje w dolinie energetycznej, kiedy koszt energii jest najniższy. Następnie w szczycie energetycznym następuje rozprężenie powietrza, którym zasilana jest typowa turbina gazowa. Ze względu na wysokie sprężanie czynnika roboczego, sięgające 7 MPa[3)], stosuje się chłodzenie powietrza przed zasobnikiem. W celu zwiększenia sprawności układu wykorzystuje się wymiennik rekuperacyjny. Schemat funkcjonowania elektrowni CAES przedstawia rysunek 1.



Rys. 1 Schemat funkcjonowania elektrowni CAES.
Źródło: opracowanie własne na podstawie [3,7]

Sprawność przetwarzania energii w układach CAES można zdefiniować jako [2]:

$$\eta_{CAES} = \frac{E_{els}}{E_{el} + Q_f}$$

gdzie:

E_{els} – energia oddana przez elektrownię CAES do sieci,
E_{el} – energia dostarczona do elektrowni CAES w postaci energii elektrycznej do napędu sprężarki,
Q_f – strumień energii chemicznej zawartej w dostarczanym paliwie.

1) Stan na koniec 2010 roku według [8].

2) Rozmiary zbiorników podziemnych są zróżnicowane i zależą od lokalnych warunków geologicznych. Objętość zbiorników waha się miedzy 150 000 m3 (Huntorf - Niemcy) do 10 000 000 m3 (Horton, Ohio - USA) [10].

3) Dane dotyczące zrealizowanej elektrowni CAES w miejscowości Huntorf (Niemcy) [6].

Ze względu na osiąganą sprawność elektrownie CAES można podzielić na [1, 10]:

- konwencjonalne o sprawności konwersji wynoszącej 42%,
- konwencjonalne z rekuperacją ciepła o sprawności konwersji wynoszącej 54%,
- wykorzystujące przemianę adiabatyczną czynnika roboczego o wysokiej sprawności konwersji wynoszącej 70%[4].

Możliwość współpracy elektrowni wiatrowej z systemem CAES

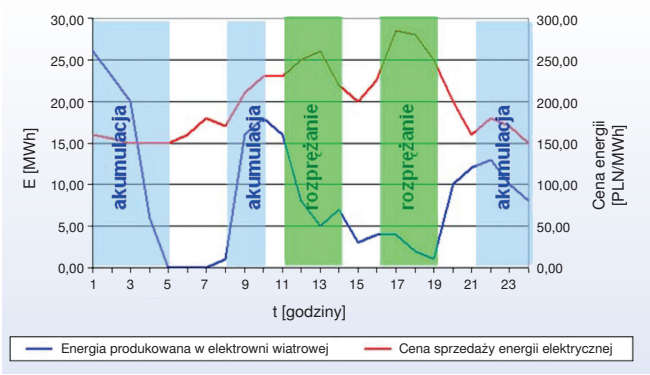
Produkcja energii elektrycznej w elektrowniach wiatrowych charakteryzuje się dużą zmiennością uzależnioną przede wszystkim od prędkości wiatru. Losowość produkcji może zostać ograniczona dzięki współpracy elektrowni wiatrowej z systemem CAES. Takie rozwiązanie może stanowić alternatywę dla akumulowania energii w elektrowniach szczytowo-pompowych lub kosztownej technologii elektrolizy wody i produkcji, a następnie magazynowania wodoru. Współpraca elektrowni wiatrowej z układem magazynowania energii CAES wymaga jednak szczególnej lokalizacji związanej zarówno z odpowiednimi warunkami wietrznymi, jak i właściwymi formacjami geologicznymi, warunkującymi możliwość budowy siłowni CAES. Według [2] na terenie Polski północno-zachodniej znajdują się lokalizacje sprzyjające budowie elektrowni CEAS. Na tym terenie istnieją również dobre warunki wietrzne dla budowy elektrowni wiatrowej [3].

Współpraca elektrowni wiatrowej z elektrownią CAES może przyczynić się do zwiększenia wyniku finansowego osiąganego przez każdą z tych technologii poprzez racjonalne wykorzystanie energii elektrycznej ze źródła odnawialnego. Energia elektryczna produkowana w farmie wiatrowej służyć może do napędu sprężarek akumulujących powietrze w zbiornikach CAES wówczas, gdy cena energii elektrycznej jest niska (np.: nocą, podczas weekendów). Natomiast podczas wyżu energetycznego, kiedy cena energii jest wysoka, następuje sprzedaż energii elektrycznej produkowanej zarówno w elektrowni CAES, jak i w elektrowni wiatrowej. Przykładową współpracę elektrowni wiatrowej z elektrownią CAES w zależności od produkcji i cen sprzedaży energii elektrycznej przedstawia rysunek 2.

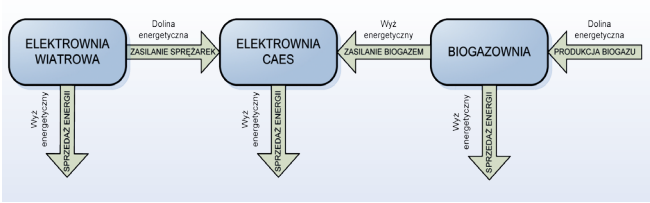
Zalety układu hybrydowego elektrownia wiatrowa - CAES:

- możliwość magazynowania energii ze źródła wiatrowego,
- maksymalizacja efektu ekonomicznego poprzez sprzedaż energii elektrycznej w szczycie,
- możliwość uruchomienia układu hybrydowego bez zasilania z zewnątrz i uzyskanie żądanej mocy w krótkim czasie,
- wzrost lokalnego bezpieczeństwa energetycznego.

Istotnymi wadami układu elektrownia wiatrowa - CAES, oprócz trudności wspólnej lokalizacji, jest określona zdolność akumulacji energii elektrycznej ograniczona pojemnością zbiornika podziemnego oraz przede wszystkim częściowa utrata zielonych certyfikatów dla energii pochodzącej z OZE, spowodowana zasilaniem turbiny elektrowni CAES gazem ziemnym. Czynnik ten może mieć decydujący wpływ na powodzenie ekonomiczne takiej inwestycji. Mając powyższe na uwadze, najlepszym rozwiązaniem ze względów ekonomicznych i ekologicznych jest połączenie trzech technologii: elektrowni wiatrowej, elektrowni CAES i biogazowni. Przy stałych dostawach substratu dla biogazowni (zapewnionych najczęściej kontraktami długookresowymi), produkcja biogazu ma charakter przewidywalny i może służyć do zasilania elektrowni CAES. Schemat współpracy trzech technologii przedstawia rysunek 3.



Rys. 2. Sprężanie i rozprężanie czynnika roboczego w elektrowni CAES we współpracy z elektrownią wiatrową w zależności od produkcji i cen sprzedaży energii elektrycznej
Opracowanie własne na podstawie [1]



Rys. 3 Schemat współpracy elektrowni wiatrowej, elektrowni CAES i biogazowni

Koszty graniczne współpracy elektrowni wiatrowej i CAES

Określenie granicznych kosztów współpracy elektrowni wiatrowej z systemem CAES nie należy do problemów trywialnych. Niemożliwa jest prosta identyfikacja stanowiska elektrowni wiatrowej tylko na podstawie danych pomiarów prędkości wiatru. Istnieje bowiem zbyt wiele czynników niezwiązanych z wiatrem, a zmiennych w czasie, jak: infrastruktura lokalna, warunki zakupu przez odbiorcę, które istotnie wpływają na wybór lokalizacji [5]. Ponadto trudno jednoznacznie oszacować, jaka część energii elektrycznej ze źródła wiatrowego zostanie wykorzystana do zasilania sprężarek elektrowni CAES, ponieważ uwarunkowane jest to zmiennością zarówno prędkości wiatru, jak i dobową zmiennością cen sprzedaży energii elektrycznej. Dodatkową zmienną jest możliwość częściowej utraty zielonych certyfikatów związanych ze sprzedażą energii elektrycznej wyprodukowanej w siłowni CAES, co powodować może zmniejszenie przychodów układu hybrydowego.

Można również uwzględnić współpracę trzech technologii: elektrowni wiatrowej, elektrowni CAES i biogazowni, co zagwarantowałoby uzyskanie zielonych certyfikatów dla całej sprzedaży energii elektrycznej. Jest to jednak kolejny czynnik

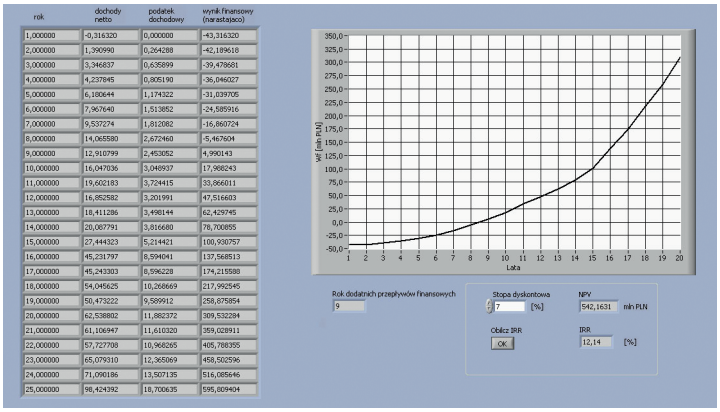
[4] Elektrownie CAES wykorzystujące przemianę adiabatyczną czynnika roboczego i osiągające sprawność przetwarzania energii około 70% są obecnie na etapie badań eksperymentalnych.

komplikujący wyznaczenie kosztów granicznych zastosowanych technologii. Ponadto występuje także problem określenia poziomu ceny energii elektrycznej, przy którym następuje akumulacja oraz poziomu ceny, przy którym następuje sprzedaż energii elektrycznej układu elektrownia wiatrowa - CAES.

Do określenia kosztów granicznych budowy i eksploatacji zaproponowanej technologii niezbędne jest zbudowanie modelu układu: elektrownia wiatrowa - CAES, a następnie opracowanie narzędzia w postaci oprogramowania umożliwiającego analizę wielowariantową.

Autor opracował oprogramowanie *Farma Wiatrowa 2.5* służące do oceny efektywności ekonomicznej elektrowni wiatrowych. Oprogramowanie to może być także wykorzystane do wstępnej analizy możliwości współpracy farmy wiatrowej z elektrownią CAES i określenia kosztów granicznych budowy takiego układu hybrydowego.

Na rysunku 4 przedstawiono wynik finansowy farmy wiatrowej o mocy zainstalowanej 30 MW współpracującej z układem CAES, skalkulowany na podstawie autorskiego oprogramowania. Jako dane wejściowe do obliczeń przyjęto rzeczywiste roczne pomiary prędkości wiatru, realne koszty inwestycyjne oraz prognozę cen sprzedaży energii elektrycznej i zielonych certyfikatów. Założono także, że graniczny koszt budowy elektrowni CAES może wynieść 50 mln PLN, co umożliwiłoby zwiększenie rocznych przychodów o 20%.



rok	dochody netto	podatek dochodowy	wynik finansowy (narastająco)
1,000000	-0,316320	0,000000	-43,316320
2,000000	1,390990	0,264288	-42,189618
3,000000	3,346837	0,635899	-39,478681
4,000000	4,237845	0,805190	-36,046027
5,000000	6,180644	1,174322	-31,039705
6,000000	7,967640	1,513852	-24,585916
7,000000	9,537274	1,812082	-16,860724
8,000000	14,065580	2,672460	-5,467604
9,000000	12,910799	2,453052	4,990143
10,000000	16,047036	3,046937	17,968243
11,000000	19,602183	3,724415	33,866011
12,000000	16,852582	3,201991	47,516603
13,000000	18,411286	3,498144	62,429745
14,000000	20,087791	3,816680	78,700855
15,000000	27,444323	5,214421	100,930757
16,000000	45,231797	8,594041	137,568513
17,000000	45,243303	8,596228	174,215588
18,000000	54,045625	10,268669	217,992545
19,000000	50,473222	9,589912	258,875854
20,000000	62,538802	11,882372	309,532284
21,000000	61,106947	11,610320	359,028911
22,000000	57,727708	10,968265	405,788355
23,000000	65,079310	12,365069	458,502596
24,000000	71,090186	13,507135	516,085646
25,000000	98,424392	18,700635	595,809404

Rys. 4. Wynik finansowy elektrowni wiatrowej o mocy zainstalowanej 30 MW współpracującej z układem CAES dla 20-letniego horyzontu czasowego

Podsumowanie

Systemy CAES są efektywną technologią magazynowania energii elektrycznej i stanowią alternatywę dla akumulacji energii w elektrowniach szczytowo- pompowych. Istnieje możliwość współpracy elektrowni wiatrowej z elektrownią CAES pod warunkiem wyznaczenia właściwej lokalizacji dla obydwu technologii i określenia kosztów granicznych budowy i eksploatacji układu hybrydowego. Niezbędne jest zbudowanie modelu, a następnie zaimplementowanie oprogramowania w celu przeprowadzenia wielowariantowych analiz efektywności. Autor opracował oprogramowanie *Farma Wiatrowa 2.5,* które może zostać wykorzystane do wstępnej analizy możliwości współpracy elektrowni wiatrowej z układem CAES.

Osobnym zagadnieniem jest eksploatacja takiego systemu, obejmująca konieczność podejmowania trafnych decyzji o akumulacji energii elektrycznej wyprodukowanej przez farmę wiatrową i sprzedaży energii elektrycznej wyprodukowanej w układzie hybrydowym w celu maksymalizacji przychodów ze sprzedaży. Zdaniem autora konieczne wydaje się opracowanie systemu eksperckiego, który obejmował będzie prognozowanie produkcji, prognozowanie cen i optymalizację akumulacji energii elektrycznej.

LITERATURA

[1] Denholm P., Sioshansi R.: The value of compressed air energy storage with wind in transmission- constrained electric power systems, *Energy Policy* 37 (2009), Elsevier, Amsterdam 2009

[2] Badyda K., Milewski J.: Magazynowanie energii z wykorzystaniem układów CAES, IV Konferencja Naukowo-Techniczna pt. „Energetyka gazowa", Warszawa 2009

[3] Lorenc H.: Atlas klimatu Polski, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa 2005

[4] Radziewicz W.: Modelowanie elektrowni wiatrowej w systemie elektroenergetycznym w otoczeniu rynkowym, Politechnika Opolska, rozprawa doktorska, Opole 2010

[5] Bartodziej G., Radziewicz W.: Narzędzia do identyfikacji stanowiska elektrowni wiatrowej, *Energetyka* 2008, nr 10

[6] Crotogino F., Mohmeyer K., Scharf R.: *Huntorf CAES*: Maore than 20 years of Successful Operation, Spring 2001 Meeting Orlando, Florida 2001

[7] Review of Electrical Energy Storage Technologies and Systems and their Potential for the UK, *URN* number 04/1876, Contractor EA Technology, 2004

[8] Global Wind Energy Council, http://www.gwec.net

[9] European Wind Energy Association, http://www.ewea.org

[10] KBB Underground Technologies, http://www.kbbnet.de